

氏名	ひら やま たか ゆき 平 山 貴 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2169 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Low Energy Dynamics of Four Dimensional $N=1$ Supersymmetric Gauge Theories and Phenomenological Applications (四次元 $N=1$ 超対称ゲージ理論の低エネルギーダイナミクスとその現象論的応用)

論文調査委員 (主査) 教授 九後太一 教授 川合 光 教授 静谷謙一

論 文 内 容 の 要 旨

超対称ゲージ理論は標準模型を越える理論の候補として有力であるとともに強結合理論の物理を解明できる可能性があるため非常に重要な研究対象となっている。例えば、強結合の量子色力学では低エネルギーでカラーが閉込められる (confinement) ことが知られているが、格子ゲージ理論によるシュミレーション以外ではこれを純理論的に証明することは困難である。しかし超対称ゲージ理論では超対称性に起因する様々な条件によりその低エネルギー有効理論の振る舞いを厳密に決定することが可能になってきた。その結果、量子色力学と同様に confinement を起こすような理論や摂動論的に安定な真空が非摂動論的效果により安定な真空が存在しなくなる理論などが存在することが分かってきた。特に興味深い現象として双対性 (Seiberg の双対性) と呼ばれる性質が存在することが明らかになった。Maxwell 方程式は電場 (E) と磁場 (B) を入れ替える変換で不変であるが Seiberg の双対性はこれの非可換群への拡張とも言うべきものになっている。

このような双対性の理解にもかかわらず、具体的にある理論の双対な理論を構成するのは一般に困難である。申請者は主論文において、直積群に基づくゲージ理論を利用する、双対な理論を構成するかなり系統的な方法を提唱した。そのポイントは、超対称性に特有な R -対称性に着目し、 R -対称性が anomalous であるとき量子論的真空構造が理論の dynamical スケールに依存しない、という点である。直積群に基づくゲージ理論において二つの dynamical スケールを入れ替えることで中間エネルギー領域の理論として異なる理論が得られるが、量子論的真空構造が dynamical スケールに依存しないことから見掛け上異なる二つの理論が実は同じ真空構造を持ち互いに双対な関係にあることが結論される。この方法を用いると反対称表現などのテンソル表現に属する物質場を含んだ理論の双対な模型を得ることができ、かつそのゲージ群が単純群になる。一般にテンソル表現に属する物質場が含まれる理論の双対な模型は構成することは困難で、これまでに知られている双対な理論の多くは直積群のゲージ理論となっていた。この点の違いが特徴の一つである。主論文ではさらに得られた双対な理論を元に様々な応用を試みている。超対称性の dynamical な破れの機構 (DSB) は現象論的にも場の理論としても興味深い対象であるが、得られた双対な理論を DSB に応用し解析を行っている。また超対称模型では confinement dynamics が重要な役割を果たすことがあるが confinement model はある種の制限がある。しかし主論文で得られた双対な理論を変形することで新しいタイプの confinement model を得ることが出来ることを指摘し構成している。

双対性という性質は全く非自明でありその起源に関しては未解明である。参考論文 1 では Seiberg の双対性を $N=2$ 超対称性理論における S-duality を変形することで得られることを明らかにした。 $N=2$ 超対称性理論は Seiberg および Witten により低エネルギー有効理論が決定され、その結果 β 関数がゼロとなる理論ではゲージ結合定数を反転させる自己双対性 (S-duality) があることが分かった。この S-duality に対し mass deformation をすることで Seiberg の双対性が得られることを示し、Seiberg の双対性が低エネルギー有効理論のレベルで成立する可能性を議論している。このとき補助場を導入

することで磁氣的理論の superpotential を再現できることを証明している。

$N=1$ 超対称ゲージ理論は標準模型を越える模型として有力である。超対称大統一理論 (SUSY GUT) では超対称性の破れと GUT ゲージ対称性の破れの機構が重要である。参考論文 2 では超対称と GUT ゲージ対称性を同時に動的に破る模型を構成した。この模型は、GUT ゲージ対称性を tree level の superpotential で破るのではなく動的に破る点と SUSY を破るパラメータが massive ゲージ多重項で誘起される点に特徴がある。通常 SUSY を破るパラメータはカイラル多重項を通じて誘起されゲージ多重項を考えることはない。これはゲージ多重項では現象論的に合うような SUSY を破るパラメータを出すことは出来ないと考えられてきたからである。しかし参考論文 2 では、それが模型に依存することであることを指摘し、実験の制限を満たし naturalness を満たす模型を実際に構成してみせた。

論文審査の結果の要旨

超対称性を持ったゲージ理論は、ゲージ階層性を自然に理解できる「標準模型を越える理論」の候補として有力であるとともに、強結合理論の非摂動的物理が理解できるという特質のために近年非常に活発に研究されている。超対称ゲージ理論は、超対称性の強い制限のためにその低エネルギー有効理論の振る舞いが厳密に決定できる場合がある。その結果、量子色力学と同様に閉じ込めを起こすような理論や摂動的に安定な真空が非摂動的効果により安定な真空が存在しなくなる理論などが存在することが分かってきた。特に興味深い現象として双対性 (Seiberg の双対性) と呼ばれる性質が存在することが明らかになった。Maxwell 方程式は電場 (E) と磁場 (B) を入れ替える変換で不変であるが Seiberg の双対性はこれの非可換群への拡張とも言うべきものになっている。

申請者は主論文において、直積群に基づくゲージ理論を利用して、双対な理論を発見・構成するかなり系統的な方法を提唱した。そのポイントは、超対称性に特有な R-対称性が anomalous であるとき量子論的真空構造が理論の dynamical スケールに依存しない、という点である。直積群に基づくゲージ理論において二つの dynamical スケールを入れ替えることで中間エネルギー領域の理論として異なる理論が得られるが、量子論的真空構造が dynamical スケールに依存しないので、見掛け上異なる二つの理論が実は同じ真空構造を持ち互いに双対な関係にあることが結論される。これまで一般にテンソル表現に属する物質場が含まれる理論の双対な模型を構成することは困難で、知られている双対な理論の多くは直積群のゲージ理論となっていたが、申請者のこの方法を用いると反対称表現などのテンソル表現に属する物質場を含んだ理論の双対な模型を得ることができ、かつそのゲージ群が単純群になる。この点がこの方法の顕著な特長の一つである。主論文ではさらに得られた双対な理論をもとに様々な応用を試みている。超対称性の dynamical な破れの機構 (DSB) は現象論的にも場の理論としても興味深い対象であるが、得られた双対な理論を DSB に応用し解析を行っている。またその双対な理論を変形することで新しいタイプの閉じ込め模型が得られることも指摘し、それを構成してみせた。

双対性という性質は全く非自明でありその起源に関しては未解明である。参考論文 1 では Seiberg の双対性が $N=2$ 超対称性理論における S-duality を変形することによって得られることを明らかにした。 $N=2$ 超対称性理論は Seiberg および Witten により低エネルギー有効理論が決定され、その結果 β 関数がゼロとなる理論ではゲージ結合定数を反転させる自己双対性 (S-duality) があることが分かった。この S-duality に対し質量項を入れて変形することで Seiberg の双対性が得られることを示し、Seiberg の双対性が低エネルギー有効理論のレベルで成立する可能性を議論している。このとき補助場を導入することで磁氣的理論の superpotential を再現できることを証明している。

$N=1$ 超対称ゲージ理論は標準模型を越える模型として有力である。超対称大統一理論 (SUSY GUT) では超対称性の破れと GUT ゲージ対称性の破れの機構が重要である。参考論文 2 では超対称と GUT ゲージ対称性を同時に動的に破る模型を構成した。この模型は、GUT ゲージ対称性を tree level の superpotential で破るのではなく動的に破る点と SUSY を破るパラメータが massive ゲージ多重項で誘起される点に特徴がある。通常 SUSY を破るパラメータはカイラル多重項を通じて誘起されゲージ多重項を考えることはない。これはゲージ多重項では現象論的に合うような SUSY を破るパラメータを出すことは出来ないと考えられてきたからである。しかし参考論文 2 では、それが模型に依存することであることを指摘し、実験の制限を満たし naturalness を満たす模型を実際に構成してみせた。

以上のように申請者は、超対称ゲージ理論の双対性に関して、双対な理論を発見する系統的な方法の開発や双対性の起源の解明、さらにはそれを応用した現象論的模型の構築においてオリジナルな寄与をした。よって、本申請論文は博士 (理学)

の学位論文として価値あるものと認める。

平成12年1月19日、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。